

**RADA NAUKOWA DYSCYPLINY  
INFORMATYKA TECHNICZNA I TELEKOMUNIKACJA POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ**

zaprasza na  
PUBLICZNĄ OBRONĘ ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

**mgr. inż. Adama Żychowskiego**

która odbędzie się w dniu **28.11.2022 roku**, o godzinie **16:00** w trybie zdalnym

Temat rozprawy:

**„Zastosowanie algorytmów ewolucyjnych w wielokrokowych Grach Obronnych Stackelberga”**

Promotor: prof. dr hab. inż. Jacek Mańdziuk – Politechnika Warszawska

Recenzenci: prof. dr hab. inż. Krzysztof Krawiec – Politechnika Poznańska

prof. dr hab. inż. Maciej Ogorzałek – Uniwersytet Jagielloński

Obrona odbędzie się zdalnie na platformie MS Teams. Osoby zainteresowane uczestnictwem w obronie proszone są o zgłoszenie chęci uczestnictwa w formie elektronicznej na adres sekretarza komisji: dr hab. inż. Maria Ganzha, prof. uczelni, – email: maria.ganzha@pw.edu.pl do dnia 25.11.2022 godz. 23:59.

Z rozprawą doktorską i recenzjami można zapoznać się w Czytelni Biblioteki Głównej Politechniki Warszawskiej, Warszawa, Plac Politechniki 1.

Streszczenie rozprawy doktorskiej i recenzje są zamieszczone na stronie internetowej: <https://bip.pw.edu.pl/Postepowania-w-sprawie-nadania-stopnia-naukowego/Doktoraty/Wszczete-do-30-kwietnia-2019-r/Dyscyplina-informatyka-techniczna-i-telekomunikacja-dziedzina-nauk-inzynieryjno-technicznych/mgr-inz.-Adam-Zychowski>

Przewodniczący Rady Naukowej Dyscypliny  
Informatyka Techniczna i Telekomunikacja  
Politechniki Warszawskiej  
**dr hab. inż. Jarosław Arabas, prof. uczelni**

## Streszczenie

**Tytuł:** *Zastosowanie algorytmów ewolucyjnych w wielokrokowych Grach Obronnych Stackelberga*

W rozprawie zbadana została możliwość zastosowania algorytmów ewolucyjnych do poszukiwania aproksymacji stanu równowagi w wielokrokowych grach obronnych Stackelberga (ang. *Stackelberg Security Games*). Gry obronne Stackelberga rozgrywane są pomiędzy dwoma niesymetrycznymi graczami nazywanymi Obrońcą i Atakującym. Obrońca wybiera swoją strategię jako pierwszy, a następnie Atakujący, znając strategię Obrońcy, decyduje się na wybór własnej, co stawia go w uprzywilejowanej sytuacji. Celem gry jest znalezienie równowagi Stackelberga czyli takiej pary strategii Obrońcy i Atakującego, dla których zmiana strategii przez któregokolwiek z graczy pogorszy jego oczekiwany rezultat. Zostało udowodnione, że w przypadku klasy gier rozważanych w rozprawie poszukiwanie tej równowagi jest problemem NP-trudnym.

Model gier obronnych Stackelberga ma istotne znaczenie praktyczne i jest szeroko wykorzystywany w rzeczywistych scenariuszach, takich jak zabezpieczenie lotnisk, walka z kłusownictwem w Afryce czy ochrona statków pasażerskich.

W literaturze dotychczas dominowały podejścia oparte o technikę programowania liniowego i całkowitoliczbowego (MILP), które są nieefektywne pod względem czasu obliczeń i zużywanej pamięci, co czyni je nieskutecznymi w przypadku większych gier.

W rozprawie zaproponowany został algorytm wzorowany na biologicznej ewolucji, który poszukuje optymalnego rezultatu poprzez przetwarzanie populacji potencjalnych rozwiązań. Skuteczność opisanego podejścia została zweryfikowana przez szereg eksperymentów, obejmujących szeroką klasę gier o różnej charakterystyce i poziomie skomplikowania. Otrzymane wyniki pokazały, że zaproponowane podejście w przeważającej większości przypadków zwraca rezultaty optymalne lub bardzo bliskie optymalnym. Jednocześnie charakteryzuje się ono krótszym czasem obliczeń i mniejszym zużyciem pamięci niż metody MILP, co pozwala na rozwiązywanie gier większych i bardziej skomplikowanych. Dodatkowymi atutami zaproponowanego algorytmu są jego uniwersalność oraz łatwość adaptacji do różnych wariantów gier, takich jak gry z częściową

---

obserwowalnością, gry z ograniczoną racjonalnością Atakującego, czy gry z niepewnością obserwacji.

W rozprawie przeprowadzono wnikliwą analizę działania zaprezentowanego podejścia, przedstawiono wyniki eksperymentów dotyczących różnych wariantów algorytmu i porównanie ich z najlepszymi metodami opisanymi w literaturze. Dodatkowo zaproponowane zostały dwa istotne rozszerzenia bazowej wersji algorytmu wykorzystujące sztuczne sieci neuronowe (podejście neuroewolucyjne) oraz dodatkową rywalizującą populację (podejście koewolucyjne).

Wyniki przeprowadzonych eksperymentów pokazały, że zastosowanie algorytmów ewolucyjnych do poszukiwania równowagi w grach obronnych Stackelberga niesie szereg korzyści i stanowi wartościową alternatywę względem innych stosowanych obecnie metod.

**Słowa kluczowe:** *algorytmy ewolucyjne, gry obronne, równowaga Stackelberga*

*A. Zychowski*

Prof. dr hab. Inż. Maciej Ogorzałek  
Zakład Technologii Informatycznych  
Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej  
Uniwersytetu Jagiellońskiego  
Ul. Prof. S. Łojasiewicza 11  
30-348 Kraków

**RECENZJA**  
**Roprawy doktorskiej**  
**mgra inż. Adama Żychowskiego**  
**pt. “ Zastosowanie algorytmów ewolucyjnych w wielokrokowych**  
**Grach Obronnych Stackelberga”**

Niniejsza recenzja została wykonana na zlecenie Rady Naukowej Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Warszawskiej (pismo Przewodniczącego Rady prof. J. Arabasa z dnia 30 czerwca 2022).

**1. Tematyka rozprawy**

Praca mgra Adama Żychowskiego dotyczy, interesującego z punktu widzenia naukowego i praktycznego, problemu poszukiwania stanu równowagi w modelach zwanych wielokrokowymi grami obronnymi Stackelberga. Gry obronne Stackelberga rozgrywane są pomiędzy dwoma niesymetrycznymi graczami nazywanymi Obrońca i Atakującym. Obrońca wybiera swoją strategię jako pierwszy, a następnie Atakujący, znając strategię Obrońcy, wybiera własną. Celem gry jest znalezienie w kolejnych krokach równowagi Stackelberga czyli takiej pary strategii Obrońcy i Atakującego, dla których zmiana strategii przez któregośkolwiek z graczy pogorszy jego oczekiwany rezultat.

Wśród zastosowań gier obronnych Stackelberga należy wymienić tworzenie rzeczywistych scenariuszy, takich jak zabezpieczenie lotnisk, walka z kłusownictwem w Afryce czy ochrona statków pasażerskich.

W przypadku klasy gier rozważanych w rozprawie udowodniono, że poszukiwanie równowagi jest problemem NP-trudnym, stąd zainteresowanie tworzeniem metod dających zadowalające aproksymacje rozwiązania optymalnego. Podjęcie tego tematu przez Doktoranta należy uznać za zadanie ambitne i ciekawe naukowo. Podjęta tematyka należy do istotnych zadań badanych w wielu laboratoriach w świecie, a nowe koncepcje i podejścia do rozwiązania problemu budzą duże zainteresowanie.

Rozwiązania problemu opisane dotąd w literaturze skupione były wokół znajdowania rozwiązań dokładnych przy pomocy programowania liniowego i całkowitoliczbowego. Tego typu podejścia mają ograniczony zakres zastosowań ze względu na czasochłonność obliczeń i wymagania pamięci, dlatego rozmiar możliwych do rozwiązania problemów jest niewielki a w zastosowaniach ogranicza się do wąskich klas problemów takich jak np. gry jednokrokowe o sumie zerowej. W literaturze istnieje bardzo mało metod, które pozwalałyby na efektywne przybliżone znajdowanie rozwiązań dla większych wielokrokowych gier obronnych.

Propozycję użycia algorytmów ewolucyjnych należy uznać w tej dziedzinie za istotne novum. Zastosowanie algorytmów ewolucyjnych otwiera możliwości rozwiązywania gier o dużych rozmiarach oraz zastosowania opracowanych algorytmów do szerokiej klasy problemów.

Analizując problematykę badawczą ujętą w pracy należy zwrócić uwagę na aspekt, który w moim przekonaniu stanowi istotną nowość. Jest to stworzenie algorytmu, który pozwala na rozwiązywanie gier o większych rozmiarach,

Autor wymienia wymagane cechy tego algorytmu:

1. skuteczność - bardzo dobra jakość wyników, powtarzalne uzyskiwanie rezultatów bliskich strategii optymalnej,
2. uniwersalność - zastosowanie bez istotnych modyfikacji do wielu wariantów gier,
3. efektywność obliczeniowa i pamięciowa - krótszy (w porównaniu do istniejących rozwiązań) czas działania i mniejsze zużycie pamięci.

Tematyka punktu 3 wymienionego powyżej jest moim zdaniem najciekawsza, gdyż bardzo niewiele badań tego typu zostało dotąd opisanych i opublikowanych.

## 2. Teza pracy

Na podstawie analizy literatury przedmiotu Autor sformułował zagadnienie badawcze, które zawarł w następującej tezie pracy:

**Możliwe jest zastosowanie algorytmów ewolucyjnych do efektywnej aproksymacji strategii w stanie równowagi, w wielokrokowych grach obronnych Stackelberga.**

W pracy po nakreśleniu tła rozważań Autor w sposób przekonujący uzasadnił tę tezę rozwijając w nowatorski sposób podejścia wcześniej nie stosowane do tego typu problemów, budując oryginalny model oraz jego implementację a w końcu przeprowadzając w oparciu o badania symulacyjne eksperymentalną walidację zaproponowanego przez siebie podejścia.

## 3. Struktura pracy

Przedstawiona do recenzji praca składa się z 10 rozdziałów. Podział i przedstawienie materiału jest logiczne, pozwala osobie czytającej na łatwą analizę materiału.

Rozdział 1 stanowi wprowadzenie prezentujące tematykę rozprawy, jej zakres oraz sformułowanie hipotezy badawczej. W rozdziale 2 zawarto wstęp teoretyczny oraz omówienie poruszanych zagadnień z zakresu teorii gier, problemów optymalizacyjnych i algorytmów ewolucyjnych. Rozdział 3 definiuje równowagę Stackelberga oraz gry obronne oraz wymienia ich praktyczne zastosowania.

Rozdział 4 zawiera przegląd opisanych w literaturze metod poszukiwania równowagi Stackelberga. W kolejnych rozdziałach Autor zawarł opis własnych koncepcji rozwiązania postawionego problemu oraz wyniki przeprowadzonych różnorodnych eksperymentów.

Rozdział 5 przedstawia ogólny schemat proponowanego rozwiązania w oparciu o procesy ewolucyjne. Wyniki eksperymentów weryfikujących jakość proponowanego algorytmu ewolucyjnego na grach o różnej charakterystyce zostały

Przedstawione w rozdziale 6. Rozdział 7 zawiera dokładniejszą analizę zaproponowanego algorytmu pod kątem wrażliwości na zmiany poszczególnych

parametrów, analizę jego zbieżności oraz stabilności. Omówione zostały także dodatkowe modyfikacje algorytmu.

Badaniu zagadnienia ograniczonej racjonalności w grach obronnych Stackelberga jest poświęcony rozdział 8. Zaproponowano w nim rozszerzenie opisywanej metody o sztuczna sieć neuronowa oceniająca jakość weryfikowanych w procesie ewolucji rozwiązań.

Rozdział 9 prezentuje nowe, koewolucyjne podejście do badanego zagadnienia oraz ocenę jego skuteczności. W rozdziale 10 zawarto podsumowanie przeprowadzonych badań oraz przedyskutowano możliwości dalszego rozwoju zaprezentowanych prac badawczych.

Praca zawiera także dość obszerny spis literatury zawierający 91 pozycji (tylko kilka jest odniesień do literatury z ostatnich pięciu lat oprócz cytowania własnych prac Autora z lat 2020 i 2021).

Strona edytorska jest bardzo dobra. Praca zawiera dobrze przygotowany zestaw wykresów i rysunków na każdym etapie prowadzonych rozważań, jest bardzo dobrze opracowana graficznie.

#### **4. Oryginalne osiągnięcia Autora rozprawy**

Najważniejsze samodzielne i oryginalne osiągnięcie Doktoranta to:

1. Zaproponowanie ogólnej postaci algorytmu ewolucyjnego rozwiązującego gry obronne Stackelberga, nazwanego EASG (Evolutionary Algorithm for Security Games).
2. Rozważenie scenariusze, dla których przejrzenie wszystkich strategii prostych Atakującego jest zbyt czasochłonne lub praktycznie niemożliwe oraz zaproponowanie efektywnego rozwiązania przy użyciu przybliżonej metody oceny jakości rozwiązania – oszacowania wypłaty obrońcy. Autor zaproponował dwa nowe podejścia:
  - (1) wykorzystanie sztucznej sieci neuronowej uczonej estymowania wypłaty obrońcy na podstawie jego strategii oraz definicji gry,
  - (2) zastosowanie podejścia koewolucyjnego, w którym populacja strategii obrońcy jest oceniana względem wybranych, reprezentatywnych strategii z równolegle rozwijanej populacji strategii atakującego.
3. Wykonanie licznych eksperymentów weryfikujących skuteczność zaproponowanego oryginalnego algorytmu ewolucyjnego (EASG) dla pięciu różnych typów gier obronnych Stackelberga w tym gier rozgrywanych na grafach w przestrzeni dyskretniej - WHG (WareHouse Games), SEG (Search Games) i FIG (Flipit Games), oraz na płaszczyźnie w przestrzeni ciągłej SGP (Security Games on a Plane) oraz tzw. gier SGS (Security Games with Signaling).
4. W każdym z testowanych typów zastosowań Autor dokonał adaptacji algorytmu ewolucyjnego, tak by mógł on być efektywnie zastosowany. Wykonał także liczne badania wariantów algorytmu dla różnych wartości parametrów zmienianych w szerokim zakresie.
5. W oparciu o wykonane eksperymenty wykazano skalowalność czasowa i pamięciową algorytmu ewolucyjnego. Czas działania algorytmu jest mniejszy niż w przypadku konkurencyjnych metod, co uwidacznia się szczególnie w przypadku gier o większych rozmiarach.

6. Ciekawym wnioskiem jest wskazanie, że dzięki temu, że algorytm ewolucyjny nie buduje drzewa gry, wykorzystuje znacznie mniej zasobów pamięciowych. Ich użycie jest w przybliżeniu stałe niezależnie od rozmiaru gry.
7. Niestychanie ciekawe są wyniki całościowej analizy zaproponowanego algorytmu ewolucyjnego - EASG. W rozdziale 7 pracy pokazano eksperymenty obejmujące badania trzech typów gier (Warehouse Games (WHG), Search Games (SEG) oraz FlipIt Games (FIG)), na podstawie których można dobrać wartości parametrów oraz określić wpływ doboru parametrów na jakość wyników i wrażliwość algorytmu na ich zmianę.
8. Przedstawiono modyfikacje metody oraz różne warianty operatorów (Rozdział 7.4) oraz rozwinięcia algorytmu przez połączenie z siecią neuronową oraz algorytm koewolucyjny (opisane w Rozdziale 9).
9. Rozdział 8 zawiera kolejne unikalne wyniki dotyczące Implementacji teorii ograniczonej racjonalności poprzez rozszerzenie algorytmu EASG.

Wykonane badania stanowią istotny przyczynek do głębszego poznania właściwości algorytmu ewolucyjnego przystosowanego do rozwiązywania różnych typów gier Stackelberga i licznych rodzajów zastosowań. Uzyskane wyniki można uznać za oryginalne i ciekawe.

## 5. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

W czasie czytania tak obszernej i wielowątkowej rozprawy nasuwa się szereg pytań, które mogą stanowić element dyskusji w trakcie obrony pracy ale nie wpływają na jednoznacznie pozytywną ocenę całości opracowania. Najważniejsze z pytań jakie nasunęły mi się podczas czytania rozprawy są następujące:

1. Autor wspomina o przydatności opracowanego algorytmu do rozwiązywania zadań o większych rozmiarach. Co określa wymiarowość rozważanych problemów?
2. Jakie wymiarowości spotykane są w rzeczywistych problemach wymagających tego typu strategii rozwiązań? Jak ocenić stopień komplikacji rozważanego problemu? Czy ocena liczby parametrów jest wystarczająca?
3. Jakie są realistyczne ograniczenia stosowalności proponowanych algorytmów?
4. Czy możliwe jest dalsze poprawienie otrzymywanych rozwiązań? W jakie sposób?
5. Jakie są możliwości przeprowadzenia testów na rzeczywistych danych?

## Podsumowanie

Oceniając pracę należy podkreślić kilka ciekawych pomysłów teoretycznych zaproponowanych przez doktoranta, które zwiększają efektywność uzyskania rozwiązania dla wybranych gier obronnych Stackelberga. Zaprezentowane podejście ewolucyjne jest prawdopodobnie pierwszym w zastosowaniu metod ewolucyjnych do rozwiązywania wielokrokowych gier obronnych Stackelberga. Nowa metoda o szerokich możliwościach dzięki łatwej adaptacji do gier obronnych o różnej charakterystyce stanowi alternatywę dla wcześniejszych rozwiązań.

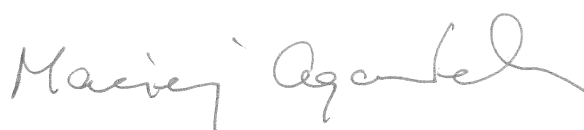
Przedstawione ciekawe rezultaty teoretyczne, nowe koncepcje algorytmów oraz wszechstronnie przeprowadzone badania symulacyjne wraz z wnioskami mają

wysoką wartość naukową i z pewnością mogą być podstawą do nadania stopnia doktora w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja.

Podsumowując stwierdzam, że przedstawiona przez mgra inż. Adama Żychowskiego praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez odnośne przepisy. Wnoszę o dopuszczenie kandydata do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Biorąc pod uwagę oryginalność osiągniętych rezultatów, szerokie możliwości zastosowań proponowanego podejścia oraz uznanie jakim cieszą się uzyskane wyniki w społeczności badaczy w świecie, co potwierdzone zostało publikacją wyników w serii ośmiu artykułów w najlepszych międzynarodowych periodykach i materiałach wiodących konferencji o zasięgu i randze światowej wymienionych na stronach 3-6 pracy, wnioskuję o wyróżnienie tej pracy.

Kraków, dnia 28 września 2022





Prof. dr hab. inż. Krzysztof Krawiec  
Instytut Informatyki  
Politechnika Poznańska  
ul. Piotrowo 2  
60-965 Poznań

Poznań, 30.08.2022

## Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Adama Żychowskiego p.t. "Zastosowanie algorytmów ewolucyjnych w wielokrokowych Grach Obronnych Stackelberga"

### 1. Tematyka rozprawy

Przedmiotem rozprawy doktorskiej mgr inż. Adama Żychowskiego jest szeroko rozumiana teoria gier, a dokładniej szczególna klasa dwuosobowych asymetrycznych wielokrokowych gier zwanych grami obronnymi Stackelberga. Szczególność tych gier polega na ich asymetrycznym charakterze: drugi gracz, zwany tradycyjnie Atakującym, ma przewagę nad pierwszym graczem (Obroncą) w postaci znajomości jego strategii. Gry obronne Stackelberga są nie tylko interesującym przedmiotem badań teoretycznych, ale znajdują też wiele zastosowań praktycznych, w których Obronca ma za zadanie chronienie pewnej infrastruktury przy pomocy ograniczonych zasobów, a Atakujący próbuje wykorzystać braki zasobowe Obroncy, przeprowadzając ataki na wybrane elementy infrastruktury.

W kategoriach teoretycznych centralnym pojęciem rozprawy jest równowaga Stackelberga, definiująca lokalnie optymalny zbiór strategii graczy, to jest taki w którym żaden z nich nie ma przesłanek do zmiany swojej strategii *ceteris paribus*, tj. przy ustalonych strategiach przeciwnika. Praca koncentruje się na wypracowywaniu nowych, efektywnych algorytmów znajdowania tej równowagi. Jedną z głównych motywacji dla rozprawy są ograniczenia algorytmów, które charakteryzują się wysoką złożonością obliczeniową (problem jest NP-trudny) oraz znacznym zapotrzebowaniem na pamięć operacyjną. W odpowiedzi na te wyzwania, Doktorant proponuje rodzinę algorytmów heurystycznych opartych na metaheurystyce obliczeń ewolucyjnych. Głównym wskaźnikiem rezultatu (metryką) wykorzystywaną w pracy jest procent instancji problemu dla których porównywane algorytmy znajdują rozwiązanie optymalne, to jest dokładny stan równowagi Stackelberga, w ramach założonego budżetu nakładów obliczeniowych i dostępnej pamięci

operacyjnej. W szerszym kontekście, rozprawa mgr Żychowskiego eksploatuje wszechobecny i bardzo istotny w praktyce przetarg pomiędzy jakością rozwiązań otrzymywanych w optymalizacji oraz nakładami obliczeniowymi potrzebnymi do ich znalezienia.

Praca jednoznacznie wpisuje się w obszar dziedziny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja.

## 2. Ocena treści rozprawy i wkładu oryginalnego

### 2.1 Treść rozprawy

Rozprawa została przygotowana w języku polskim, składa się z 10 rozdziałów i ma objętość 136 stron bez bibliografii. Po wprowadzeniu i postawieniu głównej hipotezy badawczej w rozdziale 1, w rozdziałach 2 i 3 Doktorant zwięźle prezentuje wymagane podstawy teoretyczne i definiuje klasę gier obronnych Stackelberga. W rozdziale 4 dokonuje on przeglądu algorytmów zaprojektowanych z myślą o znajdowaniu stanów równowagi Stackelberga, dzieląc je na metody dokładne i przybliżone, i koncentrując się jedynie na algorytmach uniwersalnych, co jest uzasadnione szerokim spektrum problemów praktycznych wykorzystywanych w dalszych częściach rozprawy. Kolejne rozdziały prezentują główne przyczynki prac Doktoranta. Rozdział 5 opisuje proponowany wariant algorytmu ewolucyjnego (EASG) przystosowany do efektywnego przeszukiwania przestrzeni strategii gier Stackelberga, koncentrując się (ze zrozumiałych przyczyn) na reprezentacji rozwiązań i operatorach przeszukiwania. Rozdział 6 to obszerna (ponad 30 stron) prezentacja wyników zakrojonych na szeroką skalę eksperymentów obliczeniowych, w których Autor konfrontuje EASG z referencyjnymi algorytmami dokładnymi i przybliżonymi na pięciu różnych grach i wielu instancjach tych problemów. Rozdział 7 ma także charakter eksperymentalny i zawiera analizę wpływu (wrażliwości) EASG na ustawienia poszczególnych parametrów, zbieżność algorytmu do rozwiązań optymalnych, oraz 'analizę behawioralną' EASG, w tym ocenę dynamiki algorytmu. W Rozdziale 8 Autor przeprowadza dyskusję EASG w kategoriach ograniczonej racjonalności i prezentuje wariant podejścia adresujący to wyzwanie. Rozdział 9 uogólnia EASG do wariantu koewolucyjnego. Całość przyczynków rozprawy podsumowana została w Rozdziale 10, który zawiera także krytyczną analizę proponowanych podejść i dyskusję dalszych możliwych kierunków badań.

### 2.2 Wkład oryginalny

Główne przyczynki rozprawy odpowiadają motywom przewodnim rozdziałów 5-9. Są to w mojej ocenie:

1. Zaproponowanie rodziny algorytmów ewolucyjnych EASG przeznaczonych do znajdowania równowagi Stackelberga (Rozdział 5). Proponowany sposób reprezentacji rozwiązań (w szczególności strategii mieszanej jako rozkładu prawdopodobieństwa po strategiach prostych) i operatorów przeszukiwania jest moim zdaniem naturalny i, jak pokazują prezentowane dalej w pracy wyniki eksperymentów obliczeniowych, przekłada się na



wysoką skuteczność tego podejścia na szerokiej gamie wariantów gier obronnych Stackelberga. Zaznaczmy że według rozeznania Autora proponowane podejście stanowi pionierską w skali światowej próbę wykorzystania podejść ewolucyjnych do tej klasy problemów, co moja pobieżna analiza literatury wydaje się potwierdzać.

2. Bardzo gruntowne i staranne empiryczne porównanie skuteczności algorytmu EASG z zarówno algorytmami dokładnymi jak i innymi algorytmami heurystycznymi/przybliżonym (Rozdział 6). Porównania tego Doktorant dokonał na pięciu zróżnicowanych kategoriach gier, reprezentujących zarówno gry z dyskretną jak i ciągłą przestrzenią stanów, mianowicie Warehouse Games, Search games, Games on a Plane, oraz Signaling Games. Dla każdej kategorii gier algorytmy testowane były na wielu instancjach problemów (od kilkudziesięciu do kilku tysięcy instancji per problem). Doktorant dołożył starań aby instancje problemu były zdywersyfikowane, a w przypadku ich syntetycznego generowania zbliżone do realiów zastosowań praktycznych (np. różne kategorie grafów generowanych dla problemu Signaling Games). Metody niedeterministyczne uruchamiane były 30 razy na każdej instancji problemu, aby otrzymać wiarygodną wartość oczekiwaną metryk. W każdej z tych kategorii Autor był w stanie wykazać przewagę EASG nad konkurencyjnymi algorytmami, w sensie przynajmniej jednej z rozważanych metryk skuteczności, tj. średniej różnicy wartości funkcji wypłat względem rozwiązania optymalnego, maksymalnej różnicy wartości funkcji wypłat względem rozwiązania optymalnego, procentu instancji problemu dla których algorytm znalazł rozwiązanie optymalne, czasu obliczeń, oraz zajętości pamięci operacyjnej. Różnice na korzyść algorytmów Doktoranta są często bardzo znaczące, i zostały poddane analizie statystycznej, która w zdecydowanej większości przypadków potwierdziła istotność obserwowanych różnic. Przewaga zaproponowanego podejścia jest szczególnie istotna na kryteriach zasobowych: znaczne zapotrzebowanie metod referencyjnych (zwłaszcza tych dokładnych) na pamięć operacyjną i czas obliczeniowy czynią je często nieprzydatnymi w rozwiązywaniu większych instancji problemu, podczas gdy EASG charakteryzuje się dużo lepszą skalowalnością. Kolejnym argumentem na korzyść proponowanego podejścia jest uniwersalność zaproponowanych ustawień parametrów, które zapewniło wysoką skuteczność algorytmu na wszystkich rozważanych klasach problemów. Szczególnie w przypadku dwóch ostatnich z wymienionych wyżej gier stopień ich wyrafinowania oraz wierność modelowania świata rzeczywistego (np. wielofazowość w Signaling Games, obecność niepewności informacji, błędy wykrycia akcji przeciwnika) czynią je (a zatem także wyniki wypracowane przez Doktoranta w tym zakresie) potencjalnie przydatnymi w praktyce. Rozdział zawiera także inne przyczynki związane z EASG, w szczególności lokalną optymalizację rozwiązań.
3. Dogłębne przeanalizowanie 'charakterystyki behawioralnej' EASG oraz jego wariantów (Rozdział 7). Efektem tych prac jest wyznaczenie rekomendowanych wartości parametrów (m.in. wielkości populacji i prawdopodobieństw mutacji i krzyżowania), co ułatwia dostosowanie parametryzacji algorytmu do specyfiki zadania (jak sam Autor argumentuje na końcu sekcji 7.1). Rozdział zawiera także empiryczną analizę zbieżności i innych charakterystyk algorytmu, podpartą argumentami teoretycznymi. Prezentowane wyniki pozwalają na wyrobienie sobie pewnego pojęcia o charakterystyce rozwiązań produkowanych EASG, i wskazują również na pewne jego zalety, na przykład skłonność do

konstruowania strategii mieszanych składających się z niewielkiej liczby strategii prostych (sekcja 7.3.2).

4. Zaproponowanie rozszerzonego wariantu metody (EASG\_AT), uwzględniającego ograniczoną racjonalność Atakującego, oraz empiryczne porównanie jej z innymi podejściami, w tym z algorytmem NESG, w którym wypłata obrońcy estymowana jest przy pomocy wcześniej nauczonej sztucznej sieci neuronowej (Rozdział 8). Rozdział prezentuje kilka modeli ograniczonej racjonalności oraz wykorzystuje trzy z nich w części eksperymentalnej. Wyniki sugerują że metoda EASG\_AT przy znajomości modelu ograniczonej racjonalności Atakującego osiąga najlepsze wyniki, to jest maksymalizuje średnie wypłaty obrońcy bardziej skutecznie niż podstawowa metoda EASG, i jest także lepsza niż NESG. Z drugiej strony NESG osiąga całkiem wysoką skuteczność, biorąc pod uwagę fakt że nie jest ona informowana o przyjętym przez Atakującego modelu ograniczonej racjonalności. Przyczynek ten uważam za szczególnie interesujący, ponieważ wykorzystywany tutaj model uczenia maszynowego ma za zadanie niejako przewidzieć formę nieracjonalności Atakującego jedynie na podstawie strategii Obrońcy, co z jednej strony wydaje się nadzwyczaj trudne, a z drugiej może mieć interesujące implikacje praktyczne.
5. Propozycja koewolucyjnego wariantu podejścia (Rozdział 9). Rozszerzenie to umożliwia zawężenie podzbioru strategii rozważanych przez Atakującego w odpowiedzi na akcje Obrońcy, co potencjalnie otwiera drzwi do efektywnego znajdowania skutecznych strategii Obrońcy w grach z bardzo dużą lub nieskończoną liczbą strategii Atakującego. Doktorant zaproponował tu kompetytywny algorytm ewolucyjny, w którym strategie Obrońcy i Atakującego ewoluują w osobnych populacjach i są konfrontowane ze sobą w rozgrywkach. Proces ten moderowany jest przez dobrze przemyślaną, asymetryczną funkcję celu, której konstrukcja zapobiega możliwym "patologiom". Autor przeprowadził w tym rozdziale strojenie relewantnych parametrów metody, a następnie skonfrontował ją z metodą EASG i dwoma metodami referencyjnymi na znacznej kolekcji gier. Eksperymenty wykazały znakomitą skalowalność podejścia koewolucyjnego, co pozwala mu generować wysokiej jakości strategię Obrońcy w ramach nakładów obliczeniowych o rzędy wielkości niższych niż dla podejść referencyjnych, przy jednocześnie nieznacznym jedynie pogorszeniu jakości rozwiązań. Ta sama właściwość algorytmu koewolucyjnego pozwala także na rozwiązywanie instancji problemu o rozmiarach niedostępnych dla podejść referencyjnych.

### 2.3 Ocena zawartości pracy i uwagi polemiczne

Rozprawa (a wcześniej artykuły na których została oparta) prezentuje długą listę interesujących i nowych wyników, które wypracowane zostały w oparciu o dobrze przemyślany warsztat badawczy i rozpoznanie natury problemu, w tym słabości wcześniejszych metod. Proponowane warianty podejścia adresują dobrze znane i istotne wyzwania koncepcyjne i praktyczne (m.in. ograniczoną racjonalność przeciwnika i znaczną liczbę jego strategii). Wyniki empiryczne uzyskane zostały na bazie masywnych eksperymentów obliczeniowych, przeprowadzonych na zróżnicowanej gamie klas problemów i ich instancji, i poprzedzone zostały rzetelnym rozpoznaniami właściwości metody i



strojeniem ich parametrów (spodziewam się że całkowita liczba uruchomień algorytmów szła w miliony). Co najważniejsze, eksperymenty wykazały zdecydowaną przewagę proponowanego podejścia zarówno nad metodami dokładnymi, jak i przybliżonymi, umożliwiając rozwiązywanie dużo większych instancji problemu w akceptowalnym czasie. W związku z powyższym, **moja ocena rozprawy jest zdecydowanie pozytywna.**

Z subiektywnej perspektywy, wśród zaprezentowanych przyczynków szczególnie doceniam: i) podjęte próby rozbudowy bazowego algorytmu o przeszukiwanie lokalne, ii) wykorzystanie wielu klas gier, iii) wykorzystanie mechanizmów adaptacyjnych celem zamodelowania nieznannej z góry formy nieracjonalności Atakującego, oraz iv) propozycję wariantu koewolucyjnego metody.

Pod względem redakcyjnym rozprawa została przygotowana bardzo starannie. Wprowadzenie teoretyczne jest zwarte i precyzyjne, z poprawną i klarowną formalizacją podpartą przystępnymi wyjaśnieniami w tekście. W całej pracy wywody ilustrowane są licznymi rysunkami i przykładami, co wydatnie ułatwia zrozumienie treści rozprawy.

W trakcie lektury pracy dopatrzyłem się jedynie kilku drobnych niedociągnięć redakcyjnych. W algorytmie 2.1 (str. 18) linie od 5 do 8 włącznie powinny być głębiej wcięte, to jest stanowić część ciała wyżej umieszczonej pętli while. Fraza "kolejne pokolenia populacji" (str. 40) brzmi dziwnie i redundantnie; lepiej brzmiałoby "kolejne pokolenia" lub "kolejne populacje". Na rysunku 2.5 (str. 41) testowanie warunku stopu musi być poprzedzone ewaluacją rozwiązań, ponieważ bazuje na przypisanych im wartościach funkcji oceny. Jeżeli algorytmy przedstawione przez doktoranta w sekcji 4.2 są istotnie metodami przybliżonymi w ścisłym tego słowa znaczeniu (*approximate*), a nie jedynie heurystycznymi, to przydałoby się podać ich gwarancje aproksymacyjne, jeśli są znane. Na stronie 66 (i kilkakrotnie w dalszej części pracy) podany jest limit pamięci 128GB podczas gdy na stronie 50 mowa jest o komputerze z 256 GB pamięci RAM; prawdopodobnie lepiej byłoby zapowiedzieć limit pamięci już na stronie 50.

Zdanie "*Presja selekcji mniejsza niż 0.5 ( $p_s < 0.5$ ) oznaczałaby większą szansę na promocję (zwycięstwo w turnieju) osobników o mniejszej wartości funkcji przystosowania, co naturalnie nie jest pożądaną własnością algorytmu ewolucyjnego*" (ostatni akapit na str. 85) nie jest zgodne z prawdą. Z analizy Algorytmu 2.1 (po jego skorygowaniu w sposób wspomniany przeze mnie wyżej) wynika, że dowolna większa od zera wartość parametru  $p_s$  powoduje że selekcja nie jest zupełnie losowa, to jest ma (lekką) tendencję do preferowania lepszych rozwiązań. Nie do końca zgadzam się też z dalszą częścią tego akapitu, gdzie autor wydaje się argumentować że  $p_s=1$  powoduje drastyczną redukcję różnorodności w populacji. Zwróćmy uwagę że selekcja turniejowa, zwłaszcza o niewielkim rozmiarze turnieju (zakładam za sekcją 5.9 że w całej pracy wykorzystywana jest turniej o rozmiarze 2, tj. binarna selekcja turniejowa), charakteryzuje się niezerowym prawdopodobieństwem akceptowania globalnie słabszych osobników z racji ograniczonego rozmiaru turnieju, tj. słabe rozwiązanie ma nadal szansę bycia wybranym gdy trafi do turnieju z jeszcze słabszymi konkurentami; fundamentalnie niemożliwe jest jedynie wybranie osobnika najgorszego w populacji.

[W nawiązaniu do tego przyznam że nie jestem zwolennikiem parametrycznej wersji selekcji turniejowej, która zakłada dodatkowy parametr presji selekcyjnej  $p_s$ . Używanie parametrycznej selekcji turniejowej zwiększa liczbę parametrów algorytmu, co utrudnia jego strojenie. Moim zdaniem naturalnym sposobem kontrolowania intensywności presji selekcyjnej jest dobór samego rozmiaru turnieju: Im mniejszy turniej, tym presja selekcyjna jest słabsza. W praktyce oznacza to iż selekcja turniejowa o rozmiarze 2 (bez explicite presji selekcyjnej) wywiera najsłabszą możliwą presję. Wprowadzając zabieg presji selekcyjnej w postaci parametru  $p_s$ , autor osłabia ją jeszcze bardziej. Domniemuję że taki był właśnie zamiar Doktoranta. Potwierdzają to w pewnym stopniu wyniki strojenia parametrów prezentowane w sekcji 7.1, a w szczególności Rys. 7.3(a).]

W prezentacji poszerzonych wariantów algorytmu w sekcji 7.4, bardzo istotna uwaga o ocenie modyfikowanych osobników została umieszczona w stopce. Zaskakuje też nieco że prezentacja tych wariantów metody nie nawiązuje do algorytmów memetycznych (sekcja 2.3.8), a przecież część z prezentowanych tu rozszerzeń to oczywiste instancje lokalnej optymalizacji.

Umieszczenie rozdziału 7 poświęconego optymalizacji parametrów EASG po rozdziale 6, prezentującym wyniki na tle podejść kontrolnych, jest nieco zaskakujące. Bardziej logiczne byłoby najpierw zaprezentowanie wyznaczania rekomendowanych wartości parametrów, a dopiero następnie przetestowanie podejścia "w warunkach bojowych". Jest to tym bardziej zaskakujące, że Tabela 6.1 wykorzystuje wszystkie rekomendacje uzyskane w rozdziale 7. Domniemuję że taki porządek rozdziałów wynikał z chęci wcześniejszego zaprezentowania rozważanych klas gier.

Można mieć drobne wątpliwości co do niektórych terminów wykorzystywanych w pracy. Na przykład dla angielskiego terminu *tuple* mamy naturalny polski odpowiednik *krotka*, podczas gdy autor ucieka się do kalki językowej w postaci słowa *tupla* (str. 9). Dalej, w moim doświadczeniu kryterium optymalizowane w problemie cyklu Hamiltona nazywamy najczęściej kosztem, a nie wagą (str. 14). Gdzie to możliwe, rekomendowałbym także unikanie terminologii ewolucyjnej zapożyczonej z biologii (np. chromosom, osobnik) – mamy dla tych terminów dobrze ugruntowane i jednoznaczne określenia (tu: rozwiązanie), a mnożenie synonimów niekoniecznie polepsza czytelność tekstu.

Wymienione wyżej uwagi polemiczne mają stanowić przydatną informację zwrotną, i nie wpływają na moją ogólnie pozytywną ocenę przedłożonej rozprawy.

### 3. Konkluzja końcowa

Rozprawa doktorska mgr inż. Adama Żychowskiego zawiera szereg oryginalnych osiągnięć i wyników, unikalnych w skali globalnej i dotyczących aktualnych tematów badawczych o znaczącym przełożeniu praktycznym. Uważam że hipoteza postawiona przez Autora pracy została zdecydowanie potwierdzona.

Wobec powyższego stwierdzam, że **rozprawa doktorska mgr inż. Adama Żychowskiego spełnia z solidną nawiązką warunki stawiane przez ustawę o tytule naukowym i stopniach naukowych w odniesieniu do rozpraw doktorskich, a zatem powinna być dopuszczona do publicznej obrony, o co wnoszę do Rady Dyscypliny Naukowej Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Warszawskiej.**

Ponadto, biorąc pod uwagę jakość, ilość i różnorodność zaprezentowanych w pracy wyników, oraz powiązane z nimi publikacje Doktoranta, które ukazały się w najwyżej rangowanych periodykach i konferencjach, **zdecydowanie wnioskuję o wyróżnienie rozprawy.**

